УДК 536.4

ОСОБЕННОСТИ ИСПАРЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ И ПОЛИДИСПЕРСНОГО ПОТОКА КАПЕЛЬ ВОДЫ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

Стрижак П.А., Волков Р.С., Забелин М.В., Курисько А.С.

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, e-mail: romanvolkov@tpu.ru

С применением оптических методов диагностики потоков PIVи IPI экспериментально исследованы процессы движения и испарения одиночных и группы капель воды в среде высокотемпературных продуктов сгорания. Проанализировано влияние на полноту испарения тушащей среды начальных размеров капель, их концентрации в среде высокотемпературных газов, а также начальной скорости движения. Обнаружен эффект «торможения» и даже изменения направления движения капель на выходе из рабочего канала (для капель с характерными размерами $R_{\rm m} \leq 0.08$ мм). Показано, что при высокой концентрации капель тонкораспылённой воды в среде высокотемпературных продуктов сгорания наблюдается эффект коагуляции, который приводит к снижению интенсивности испарения тушащей среды. Сформулированы выводы о необходимости для обеспечения максимальной эффективности использования распылённого потока снижения начального радиуса капель до $R_{\rm m} \leq 0.08$ мм, а также стадийного, распределённого во времени и пространстве распыления тушащего состава.

Ключевые слова: тепломассоперенос, испарение, высокотемпературные газы, распыленная вода, капли, оптические методы диагностики газопарожидкостных смесей

FEATURES OF SINGLE AND POLYDISPERSEFLOW WATER DROPLETS EVAPORARION IN HIGH TEMPERATURE GAS AREA

Strizhak P.A., Volkov R.S., Zabelin M.V., Kurisko A.S.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: romanvolkov@tpu.ru

The motion and evaporation processes of single water droplets and groups of them in high-temperature combustion products area have been investigated experimentally with the usage of PIV and IPI optical methods of flow diagnostic. The droplet initial sizes, their concentration in high-temperature gas area, as well as the initial motion velocity influence on the extinguishing liquid evaporation completeness have been analyzed. The «slowdown» effect and even reverse of droplets at operation channel outlet (for droplets with characteristic sizes $R_{\rm m} \leq 0.08$ mm). It has been demonstrated that the coagulation effect is observable at high concentration of water mist droplets in high-temperature combustion products area. This effect leads to decrease of extinguishing area evaporation intensity. Conclusions about the necessity ofinitial droplet radius decreaseup to $R_{\rm m} \leq 0.08$ mm to maximize the atomized flow usage effectiveness, as well as phasic extinguishing composition atomization have been formulated.

Keywords:heat and mass transfer, evaporation, high-temperature gases, water spray, drops, optical diagnostic methods gas-vapor-liquidmixtures

Как известно, локализации зоны пламени и ликвидации очагов возгораний различного происхождения способствует снижение температуры в пламенной зоне горения в результате интенсификации эндотермических фазовых превращений. Высокая эффективность использования «тонкораспыленной» воды и «пароводяных завес» (размеры капель жидкости от 10 мкм до 500 мкм) при тушении пожаров в помещениях различного назначения обоснована теоретически [1, 2] и экспериментально [3, 4]. Установлено [1-4], что измельчение капель жидкости при ее специализированном распылении способствует интенсификации парообразования и поглощению большей (по сравнению с массивами нераспыленной воды) доли энергии пламени в процессе пожаротушения. Однако эффективность использования тушащей среды может значительно

снижаться вследствие влияния соседних капель распылённой воды на полноту испарения. В реальной практике только испарившаяся жидкость (согласно [5, 6]) приводит к подавлению процесса горения как за счет снижения температуры пламени, так и за счет блокирования парами процесса поступления окислителя из внешней среды в зону реакции.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния условий распыления жидкости на интегральные характеристики испарения воды в зоне горения.

Экспериментальный стенд и методы исследований

При экспериментальных исследованиях использовалась установка, схема которой аналогична [7]. Исследования проводились с использованием оптических методов [8–10] диагностики двухфазных

газопарокапельных смесей «Particle Image Velocimetry» (PIV), «Interferometric Particle Imaging» (IPI).

Результаты исследования и их обсуждение

С использованием оптических методов (PIV и IPI) диагностики двухфазных многокомпонентных газопарожидкостных потоков по видеограммам экспериментов вычислялись значения скоростей движения $u_{\rm m}$, размеров $R_{\rm m}$ и относительной концентрации $a_{\rm m}$ капель жидкости в области высокотемпературных газов. В таблице приведены типичные результаты вычислений.

Установлено, что при движении распыленной жидкости через высокотемпературную газовую среду происходит существенное изменение компонентного состава газопарожидкостной смеси. Так, например, при начальной температуре $T_{\rm w}=293~{\rm K}$ капли воды с начальными размерами $R_{\rm m} \leq 0,08~{\rm m}$ полностью испаряются в высокотемпературной газовой области, и, как

следствие, на выходе из рабочего канала для этой группы выполняется условие $\alpha_{\rm m} \to 0$. При $0.08 < R_{\rm m} \le 0.16$ мм размеры капель уменьшаются на 47%, $0.16 < R_{\rm m} \le 0.23$ мм — на 30%, $0.23 < R_{\rm m} \le 0.3$ мм — на 23%, $0.3 < R_{\rm m} \le 0.37$ мм — менее чем на 17%.

 $0.3 < R_{\rm m} \le 0.37$ мм — менее чем на 17%. При изменении дисперсности (за счет уменьшения $R_{\rm m}$ и особенно $\alpha_{\rm m}$) капель значительно снижаются скорости $\ddot{\mathbf{u}}$ х движения $u_{\mathbf{m}}$ во встречном потоке высокотемпературных газов. Так, в таблице приведены значения $u_{\scriptscriptstyle \mathrm{m}}$ для выделенных условно (по начальным размерам) групп капель. Капли с характерными размерами $R_{\rm m}$ ≤0,1 мм (группы № 1 и № 2) значительно замедляют движение $(u_m \to 0)$. Для капель группы № 3 уменьшение $u_{\scriptscriptstyle m}^{\scriptscriptstyle m}$ относительно начальных значений происходит на 65–70%, группы № 4 – на 55–60%, группы № 5 – на 39 - 42%. Полученные результаты можно объяснить как встречным движением высокотемпературных газов (рис. 1), так и существенным уменьшением (таблица) размеров (как следствие, значительной убылью массы) капель жидкости при испарении.

Средние значения интегральных параметров движения капель распыленной жидкости $(T_{_{\rm w}}$ = 93 K) через канал с высокотемпературной газовой средой

Наименование параметра	№ группы	На входе в канал	На выходе из канала
R _m , mm	1	0,075	-
	2	0,131	0,076
	3	0,187	0,129
	4	0,246	0,188
	5	0,308	0,242
α _m , %	1	14,44	-
	2	31,33	12,88
	3	39,55	32,22
	4	15,77	48,00
	5	3,77	12,22
<i>u</i> _m , m/s	1	0,711	-
	2	0,724	0,134
	3	0,782	0,249
	4	0,849	0,377
	5	0,943	0,548

На рис. 1 представлены изолинии скоростей «трассирующих» частиц на входе в рабочий канал с высокотемпературными газами. Можно выделить несколько контуров завихрений, характеризующих «торможение» движения капель жидкости и изменение направления их перемещения на противоположное. Эти контуры соот-

ветствуют каплям с начальными размерами $R_{\rm m} \leq 0.08$ мм. При $R_{\rm m} > 0.08$ мм движение капель также замедляется. Но вокруг таких капель формируются лишь локальные контуры завихрений вследствие парообразования и уноса непосредственно «трассирующих» частиц восходящими газами (рис. 1). За счет эндотермических фазовых превращений уменьшается температура газов в малой окрестности капель. Также снижаются скорости движения последних. Это достаточно хорошо видно на гистограмме скоростей, приведенной на рис. 2.

Показано (рис. 2), что из всего спектра

векторов «трассеров», соответствующих газам, водяным парам и каплям жидкости, в типичной регистрационной области видеограммы (на входе в канал) лишь для 20--30% скорости $u_{\rm m}$ достигают значений 0,5--1 м/с. Эти «трассеры» соответствуют каплям с начальными размерами $R_{\rm m} > 0,08$ мм. Остальные «трассеры» представляют частицы ТiO_2 , высвободившиеся при испарении малых ($R_{\rm m} < 0,08$ мм) капель и движущиеся с восходящим потоком высокотемпературных газов. Скорости таких «трассеров» изменяются в достаточно широком диапазоне (рис. 2) вследствие завихрений (рис. 1).

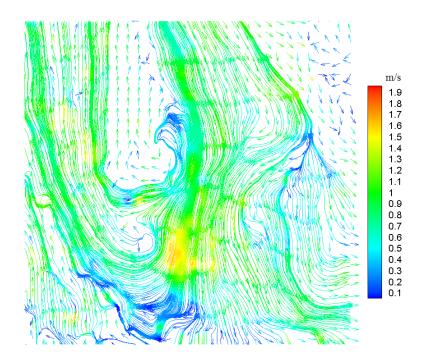


Рис. 1. Изолинии скоростей «трассирующих» частиц на входе в область высокотемпературных газов при T_w . = 303 K и 0,05. \leq R $_m$. \leq 0,37 мм

Также выявлено, что определяющую роль при смешении газо- и парожидкостных потоков играет явление коагуляции капель жидкости. Этот процесс зарегистрирован для капель, имеющих, как правило, различные размеры и скорости, но достаточно близкие траектории перемещения. Полученные в экспериментах поля скоростей «трассеров» позволили выделить два основных механизма возникновения явления коагуляции капель жидкости в потоке высокотемпературных газов: поток газов способствует «торможению» идущих во фронте парожидкостной смеси водяных капель, их «развороту» и последующему слиянию с идущими навстречу каплями жидкости; капли, попадая в завихрения газов, сливаются между собой (одна «догоняет» другую при интенсивном испарении первой и достаточно медленном последующих). Проявление эффекта коагуляции существенно зависит от концентрации капель в потоке распыленной жидкости ($\alpha_{\rm m}$). Так, при достаточно малых (до 10 капель с размерами $0.2 < R_{\rm m} \le 0.5$ мм в объеме более 1000 мм³) концентрациях слияние капель носит практически единичный характер. С увеличением концентрации реализация этих процессов уже закономерна.

Для оценки полноты испарения тушащей среды введен в рассмотрение параметр ΔR , характеризующий уменьшение среднего условного радиуса капель при движении через высокотемпературную область $\Delta R = ((R^{\text{inp}} - R^{\text{out}})/R^{\text{inp}})100$, где R^{inp} , $R^{\text{out}} - \text{радиус капель на входе и выходе из рабочего канала, мм.$

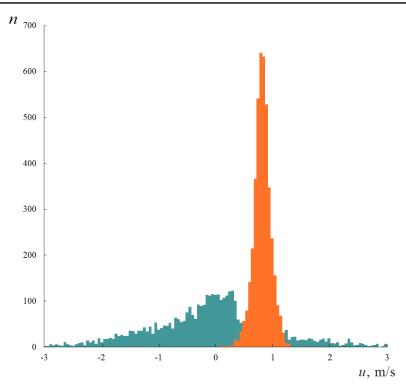


Рис. 2. Гистограммы скоростей капель распыленной жидкости на входе (и выходе (ш) из области высокотемпературных газов при $T_w = 303~{\rm Ku}~0.05 \le R_m \le 0.37~{\rm мм}$ (и – скорости «трассирующих» частиц; n – количество векторов «трассирующих» частиц на плоскости поля скорости)

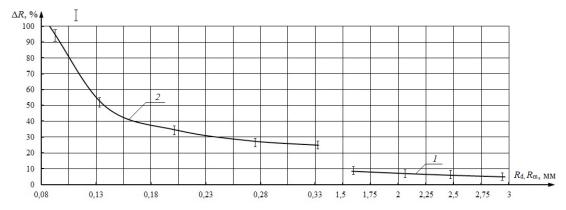


Рис. 3. Зависимости параметра ΔR от начального радиуса одиночных капель воды (1) и капель тонкораспылённой воды (2)

На рис. 3 представлены зависимости ΔR от начальных радиусов одиночных капель $(R_{\rm d})$ и группы капель $(R_{\rm m})$. Видно (кривая I), что интенсивность испарения крупных капель $(R_{\rm d} \geq 1,5$ мм) невелика.Полученный результат можно объяснить следующим: с увеличением размеров капель возрастает их масса. Вода характеризуется высоким значением энергии фазового перехода, поэтому при прохождении крупной каплей небольшого расстояния в среде высокотемпературных газов условия тепломас-

сообмена не позволяют осуществить подвод количества энергии, необходимого для прогрева приповерхностного слоя и интенсификации фазового перехода. Результаты экспериментальных исследований испарения капель тонкораспылённой воды $(0.8 \le R_{\rm m} \le 0.33~{\rm mm})$ в среде высокотемпературных газов (кривая 2) свидетельствуют о значительно более интенсивных процессах тепломассопереноса, благодаря которым скорость испарения капель значительно выше.

Заключение

Проведённые с использованием оптических методов (PIV и IPI) экспериментальные исследования движения и испарения одиночных и группы капель воды в среде высокотемпературных продуктов сгорания показали, что для обеспечения наибольшей полноты испарения тушащей среды необходимо снижение начального характерного размера капель $R_{\rm m} \leq 0,08$ мм. Кроме того, для обеспечения условий максимальной скорости испарения в пламени необходимо реализовывать последовательный, стадийный и распределённый во времени и пространстве ввод капель потока тушащей среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 14-08-00057).

Список литературы

- 1. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Анализ влияния начальной температуры распылённой воды на интегральные характеристики её испарения при движении через зону «горячих» газов // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87, № 2. С. 436–444.
- 2. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Экспериментальное исследование полноты испарения распыленной воды при ее движении через пламя // Пожаровзрывобезопасность. 2013. № 10. С. 15–24.
- 3. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное исследование тепломассопереноса при движении «тандема» капель воды в высокотемпературной газовой среде // Тепловые процессы в технике. 2012. № 12. С. 531–538.
- 4. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.
- 5. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 301 с.
- 6. Damaschke N., Nobach H., Tropea C. Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniquesin fluid mechanics // Experiments in Fluids. 2002. V. 32. № 2. P. 143–152.
- 7. Foucaut J.M., Stanislas M. Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields // Measurement Science and Technology. 2002. V. 13. P. 1058–1071.

- 8. Strizhak P.A. Influence of droplet distribution in a «water slug» on the temperature and concentration of combustion products in its wake // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2013. V. 86, № 4. P. 895–904.
- 9. Volkov R.S., Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Experimental study of the change in the mass of water droplets in their motion through high-temperature combustion products // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2013. V. 86, № 6. P. 1413–1418.
- 10. Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry // Measurement Science and Technology. 1997. V. 8. P. 1379–1392.

References

- 1. VolkovR.S., KuznetsovG.V., StrizhakP.A. Inzhenerno-fizicheskijzhurnal, 2014, vol. 87, no. 2, pp. 436–444.
- 2. VolkovR.S., KuznetsovG.V., StrizhakP.A.Pozharovzryv obezopasnost', 2013, no. 10, pp. 15–24.
- 3. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.Teplovyeprocessy v tehnike, 2012, no. 12, pp. 531–538.
- 4. Grishin A.M. Matematicheskoemodelirovanielesnyhpo zharovinovyesposobybor'by s nimi [Mathematical modeling of forest fires and new ways of dealing with them]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. 408 p.
- 5. Kuznetsov G.V., Baranovskij N.V. Prognozvoz niknovenijalesnyhpozharoviihjekologicheskihposledstv ij [Forecast of forest fires and their environmental effects]. Novosibirsk, SORANPubl., 2009. 301 p.
- 6. Damaschke N., Nobach H., Tropea C. Experiments in Fluids, 2002, vol. 32, no 2, pp. 143–152.
- 7. Foucaut J.M., Stanislas M. Measurement Science and Technology, 2002, vol. 13, pp. 1058–1071.
- 8. Strizhak P.A. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2013, vol. 86, no. 4, pp. 895–904.
- 9. Volkov R.S., Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2013, vol. 86, N 6, pp. 1413–1418.
- 10. Westerweel J. Measurement Science and Technology, 1997, vol. 8, pp. 1379–1392.

Рецензенты:

Шидловский С.В., д.т.н., профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск;

Немова Т.Н., д.т.н., профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск.

Работа поступила в редакцию 10.06.2014.